

利用建筑垃圾生产混凝土的性能研究

许岳周¹, 石建光²

(1. 宁波中鼎建筑设计研究院, 浙江 宁波 315000; 2. 厦门大学 土木工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 通过对再生骨料基本性能的研究,根据再生骨料的特殊物理性能,设计研究了不同级配下的再生骨料混凝土的工作性能和抗压强度。当细骨料采用天然砂,级配合理时,再生混凝土 28 d 抗压强度可以达到 44 MPa,工作性能良好;当粗细骨料都采用再生骨料,再生骨料的粒径分布为 0~5 mm 约占 60%~70%,5~10 mm 约占 30%~40%时,可以满足配制强度为 15 MPa 再生混凝土的要求,粗、细骨料的重量比达到 50%以上时再生混凝土的工作性比较好、强度可以达到 12.4~14.9 MPa。

关键词: 再生混凝土;再生骨料;建筑垃圾

中图分类号: TU528.041 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3550(2008)12-0118-04

Performance of recycled concrete from construction waste

XU Yue-zhou¹, SHI Jian-guang²

(1. Ningbo Zhongding Architectural Design and Research Institute, Ningbo 315000, China;

2. Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The fundamental characteristics of recycled aggregate are investigated firstly. Furthermore, based on the special physical properties of recycled aggregate, the work performance and compressive strength of recycled aggregate concrete are studied. The results show that, when the fine sand is used as the fine aggregate and the gradation is reasonable, the 28 days compressive strength of recycled aggregate concrete may be as high as 44 MPa and the work performance of recycled aggregate concrete is also fairly well; when the recycled aggregate is used as the coarse and fine aggregate, and the particle size distribution of the recycled aggregate is as follows: 0~5 mm (approximately 60%~70%), 5~10 mm (approximately 30%~40%), the compressive strength of recycled aggregate concrete can meet the requirement on the strength of 15 MPa; when the weight ratio of the coarse and fine aggregate is more than 50%, the work performance of recycled aggregate concrete is reasonably well and the compressive strength of recycled concrete may be between 12.4 MPa and 14.9 MPa.

Key words: recycled concrete; recycled aggregate; construction waste

0 引言

中国作为经济快速发展的发展中国家,一方面由于处于工业化、城市化、现代化的进程中,另一方面由于人口众多,使得资源消耗的增长速度快、消耗数量巨大,同时在城市改造和工程建设中也产生大量的建筑垃圾。2005 年中国的水泥产量达到 10 亿 t^[1],为世界水泥产量 22.2 亿 t 的 45%^[2],2006 年达到 12.35 亿 t,增长 23.5%。但经估算仅 2004 年产生的混凝土垃圾就有 2.37 亿 t,而且每年以 8% 速度增加^[3]。这种大量消耗或需要资源材料和大量产生垃圾的局面只有通过各种循环再生技术解决,重用、再用、减量(reuse, recycle and reduction)即“3Rs”是最有效的技术^[4]。从工程建设材料的特点、技术要求和各种资源、垃圾材料组成考察,利用建筑垃圾生产混凝土骨料配制各种用途的混凝土是有效的技术途径。一方面减少对砂石等天然材料的消耗,另一方面避免大量建筑垃圾引起环境污染和侵占土地,是“3Rs”技术在土建领域的具体实施途径。为此,本文对分离建筑垃圾中的主要材料混凝土制造再生骨料混凝土和直接破碎建筑垃圾制造再生骨料混凝土砌块这两种再生技术途径进行了试验研究,探讨了再生骨料混凝土和再生骨料混凝土砌块性能。

收稿日期: 2008-08-12

1 再生骨料混凝土的性能

混凝土块体是建筑垃圾中的主要成分,将这些混凝土块体从建筑垃圾中分离出来,经破碎、筛分等工艺,制作成混凝土骨料,生产成再生骨料混凝土,是目前日本、德国、美国等国家规范容许的技术途径。如美国混凝土骨料规范 C0033—03 明确规定混凝土骨料包括再生骨料。德国钢筋混凝土委员会颁布《再生骨料混凝土的应用指南》中第二部分给出了再生骨料的质量要求,指出再生骨料混凝土必须符合规范 DIN4226 中与天然骨料相同的技术要求。日本于 1994 年 4 月颁布了《再生骨料混凝土材料的质量试行条例》,试行条例给出了再生骨料、再生基层材料和填充材料的质量标准,并根据其质量将再生粗骨料划分成 3 个等级^[5]。

由于再生骨料性能如堆积密度和表观密度、吸水率、压碎指标等不同于天然骨料,使得再生骨料混凝土性能与天然骨料混凝土性能有明显的差异。众多的研究表明,以再生骨料部分或全部替代天然骨料生产再生骨料混凝土,其抗压强度、抗拉强度和弹性模量随再生骨料替代率的提高和水灰比的增大而降低,收缩性会随着再生骨料替代率的提高而快速增大,各项

耐久性指标普遍略低于天然骨料混凝土^[6]。

作为再生骨料混凝土的生产,除要确定或控制再生骨料以及再生骨料混凝土的性能外,还需要确定再生骨料混凝土的材料配合比,而混凝土配合比的确定与骨料级配有直接的关系。为此进行了再生骨料级配对再生骨料混凝土强度影响的试验研究。

1.1 试验用材料

试验用水泥为福建水泥有限公司建福水泥厂生产的建福牌P·O 32.5 级水泥,砂料为普通天然砂,拌合水为自来水。天然粗骨料为天然石材加工而成的碎石,粒径范围为 4.75~31.5 mm,连续级配。再生粗骨料为厦门某住宅小区拆迁后的废弃混凝土破碎加工而成,粒径范围为 4.75~31.5 mm,连续级配。骨料级配和性能见表 1、2。

表 3 级配设计	
设计组	级配设计
S1	天然骨料级配。
S2	再生骨料的原始级配,即再生骨料由废弃混凝土破碎加工直接得到的级配。
S3 S4 S5	参考混凝土泵送施工技术规程中的 3 组级配,分别为根据规程中最佳级配范围的上包络线,下包络线和最佳级配曲线而设计的级配。
S6 S7 S8	根据再生粗骨料本身基本性能而设计级配。
S9	60%原始再生骨料替代天然骨料。
S10	再生粗骨料在 4.75~19 mm 粒径范围内完全替代天然骨料。
S11	再生粗骨料在 19~31.5 mm 粒径范围内完全替代天然骨料。

表 4 混凝土的级配和配合比								kg/m³
设计 编号	级配				水	水泥	细骨料	天然骨料
	4.75~9.5 mm	9.5~19 mm	19~26.5 mm	26.5~31.5 mm				
S1	NA35	NA584	NA343	NA140	220	400	800	
S2	RA121	RA198	RA506	RA275	220	400	800	
S3	RA231	RA657	RA77	RA135	220	400	800	
S4	RA106	RA510	RA176	RA308	220	400	800	
S5	RA187	RA595	RA117	RA202	220	400	800	
S6	RA55	RA330	RA275	RA440	220	400	800	
S7	RA275	RA569	RA202	RA55	220	400	800	
S8	RA55	RA385	RA330	RA330	220	400	800	
S9	RA94	RA153	RA392	RA213	220	400	800	NA568
S10	RA146	RA440	NA440	NA146	220	400	800	
S11	NA146	NA440	NA440	RA146	220	400	800	

注:NA 表示天然骨料,RA 表示再生骨料。

所有试验混凝土拌合物均采用机器搅拌和振捣,按照 GB/T 50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法》操作。24 h 后拆模,在标准养护条件下养护至一定龄期测试其抗压强度,试块尺寸均为 100 mm×100 mm×100 mm,抗压强度测试按照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》操作,压力机型号为 YE-2000,最大荷载 2 000 kN。

1.3 试验结果

再生混凝土的工作性能,抗压强度和界面破坏状况等如表 5 所示。根据 S3、S4、S5 和 S7 等 4 组再生粗骨料级配制作而成的再生混凝土试块,其抗压强度都很低,28 d 抗压强度不到 15 MPa。这 4 组再生粗骨料当中,4.75~19 mm 粒径范围内的再生粗骨料含量较高,占有粗骨料含量 56%~80%。S6 和 S8 两组骨料级配当中,减少了粗骨料中较细骨料的含量,提高了粗骨料粒径为 16~31.5 mm 骨料含量,试验表明 S6 和 S8 粗骨料级配制备的再生混凝土的抗压强度有了很大的提高,其 28 d 抗压强度甚至达到了 40 MPa 左右。

为考察混合骨料对再生混凝土抗压强度的影响,设计了 S9、

表 1 骨料级配						
筛孔径 /mm	4.75	9.5	19	19	26.5	31.5
天然骨料筛上留量 /%	100	97	44	44	12.7	0
再生骨料筛上留量 /%	100	89	63	63	25.0	0

表 2 骨料基本性能						
骨料类型	堆积密度	表观密度	吸水率	含水率	压碎值指标	针片状含量
	/(kg/m³)	/(kg/m³)	/%	/%	/%	/%
天然骨料	1 540	2 670	0.82	0.72	20	31
再生骨料	1 340	2 630	4.55	0.45	32	25

1.2 试件配合比

试验了 13 组不同级配再生混凝土试块,见表 3,再生混凝土试块的级配和配合比,见表 4。

S10、S11 三组试件。S9 为 60%再生粗骨料替代天然骨料,S10 为 50%粒径 4.75~16 mm 的再生骨料替代天然骨料,而 S11 为 50%粒径 16~31.5 mm 的再生骨料替代天然骨料。通过对 7、28、56 d 的抗压强度的考察,发现经过替代处理的再生混凝土强度得到大幅度的提高,远远高于原始级配制备的再生混凝土。尽管 S10 和 S9 级配曲线中 4.75~9.5 mm 粒径的粗骨料含量较 S6 有所提高,但 S9 和 S10 级配中分别含有 40%和 50%的天然骨料,其天然骨料的较小吸水率弥补了所增加的较细再生粗骨料的吸水量,并且改善了再生骨料本身级配,从而达到优化了原始再生骨料级配的目的,使得再生混凝土的强度有了很大的提高。

从以上的试验结果可以看出:①直接用破碎的连续级配再生骨料配制混凝土,其工作性能和强度都会明显降低,抗压强度仅能达到天然骨料混凝土的 57%;②按混凝土泵送施工技术规程中的最佳级配范围的上包络线、下包络线和最佳级配曲线进行设计,配制再生骨料混凝土,其骨料中粒径范围 4.75~19 mm 的骨料占粗骨料的 56%~80%,这时工作性能变差、抗压强度更低,为直接用破碎的连续级配再生骨料配制的混凝土强度的

表 5 再生混凝土的工作性能,抗压强度和界面破坏状况

设计 编号	坍落度 /mm	保水性	和易性	7 d 强度 /MPa	28 d 强度 /MPa	56 d 强度 /MPa	界面破坏状况
S1	50	好	好	19.1	29.3	33.9	少量天然骨料破坏
S2	35	较好	较好	12.5	18.4	19.2	少量骨料破碎,主要沿再生骨料面破坏
S3	40	差	差	10.3	13.4	14.9	沿再生骨料面破坏
S4	39	差	差	9.2	13.0	13.5	沿再生骨料面破坏
S5	70	一般	一般	8.7	12.9	13.7	沿再生骨料面破坏
S6	80	好	好	27.1	43.0	44.1	大量再生骨料破碎,再生骨料砂浆与原天然骨料分离,破坏面贯穿再生骨料
S7	30	差	差	7.0	10.8	12.1	沿再生骨料面破坏
S8	50	一般	一般	29.4	38.8	42.0	再生骨料砂浆与原天然骨料分离,破坏面贯穿再生骨料
S9	70	好	好	30.8	37.9	48.2	再生骨料砂浆与原天然骨料分离,破坏面贯穿再生骨料
S10	40	一般	一般	30.0	42.4	45.2	大量再生骨料破碎,再生骨料砂浆与原天然骨料分离,破坏面贯穿再生骨料
S11	60	较好	较好	27.2	40.8	46.2	大量再生骨料破碎,再生骨料砂浆与原天然骨料分离,破坏面贯穿再生骨料

70~77%;③粒径范围 4.75~19 mm 的骨料占粗骨料的 35%~40% 时,再生骨料混凝土的工作性能好、抗压强度达到 42~44.1 MPa;④再生骨料部分替代天然骨料,替代率为 53%~60%时,不论全部级配范围的替代,还是仅替代粒径范围 4.75~19 mm 的骨料或粒径范围 19~31.5 mm 的骨料,再生骨料混凝土的工作性能好、抗压强度达到 45.2~48.2 MPa。

2 再生骨料混凝土砌块性能

随城市道路建设和建筑墙体改革,各种混凝土制品包括混凝土空心砌块、混凝土多孔砖、混凝土实心砖、混凝土路面砖和混凝土路缘石等快速发展,这些混凝土制品的需求和生产快速增加,2006 年混凝土空心砌块的生产量 6 300 万 m³,混凝土多孔砖 1 300 万 m³。经估算仅 2005 年用于这些混凝土制品生产的混凝土用量达到 7 441 万 t。按水泥和砂石比例按 1:4 估算,砂石骨料的用量约为 5 953 万 t。用建筑垃圾为各种混凝土制品生产骨料是一条很有前途的技术途径。为此进行了再生骨料混凝土砌块的试验研究。

2.1 试验用材料

建筑垃圾成分比较复杂,主要组分有混凝土(包括道路沥青混凝土),含量约 1%~70%;废旧黏土烧结砖,含量约 2%~75%;钢筋,含量约 0.1%~2%;旧砂浆,含量约 0~15%;黏性土,含量约 3%~15%;废木材,含量约 0.5%~5%;废旧塑料,含量约 0.01%~0.2%;废薄膜,含量很少但很难处理;废玻璃,含量约 0.2%~2%以及破衣物和其他少量的生活用具、用品等。当运送建筑垃圾的载重车辆到达场区后,直接把建筑垃圾倾倒到建筑垃圾收集料斗内。大于 500 mm×500 mm 的混凝土、砖墙、石块来用风镐将其分解,大于 500 mm×500 mm 的木材和衣被、织物等在料斗口用人工搬除,其余部分投入大型破碎机内,破碎至粒径小于 300 mm 的碎料,送至分选输送皮带。在试验中发现,把粒径在 0~10 mm

之间的建筑垃圾骨料分成 0~4 mm 和 5~10 mm 则其离析现象在运输、存贮中就变得很小了。经过筛分的 0~5 mm 的建筑垃圾细骨料颗粒级配如表 6 所示。

表 6 建筑垃圾砂细度筛分表

粒径 / mm	5~2.5	2.5~1.25	1.25~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15	<0.15
含量 / %	24.9	28.75	25.78	9.7	10.33	0.54
累计筛余 / %	24.9	53.65	79.43	89.1	99.46	100

测试建筑垃圾骨料的表观密度为 2 520 kg/m³,堆积密度 1 150 kg/m³,细度模数 3.46,属于粗砂,级配偏粗但仍在规范第一级配区内。

压碎指标是表征骨料强度的一个参数。中华人民共和国建筑用卵石、碎石国家标准 GB/T 14658—2001 规定:I 类骨料的压碎指标应小于 10%,II 类应小于 20%,III 类应小于 30%。建筑垃圾骨料的压碎指标为 19%~26%,能满足国标中 III 类骨料对压碎指标的要求,根据国标 GB/T 14658—2001,III 类骨料宜用于混凝土强度 <C20 的混凝土,因此建筑垃圾骨料的压碎指标性能满足大多数实际制砖混凝土的要求。

同天然砂石骨料相比,建筑垃圾骨料的堆积密度比天然骨料低,其堆积密度为 1.29~1.36 kg/m³。

2.2 建筑垃圾混凝土配合比

建筑垃圾经过两到三级破碎之后,其粒径分布为 0~5 mm 约占 60%~70%,5~10 mm 约占 40%~30%。针对这些具体情况,应采用不同的办法,综合考虑经济性、和易性、强度等因素,加入不同的组分,进行试验改良,找出该批次建筑垃圾骨料的最佳配合比。每次建筑垃圾原料发生大的变化时,如骨料的成分、吸水率、堆积密度就会发生大的改变,此时就应及时试验、调整混凝土配合比。表 7 为砖瓦成分含量在 65%右、骨料吸水率在 13%左右、堆积密度为 1 050~1 159 kg/m³ 的骨料,强度为 15 MPa 的建筑垃圾骨料混凝土的配合比。

表 7 建筑垃圾骨料混凝土配合比

	水泥	建筑垃圾骨料		水	新拌密度 /(kg/m ³)	干密度 /(kg/m ³)	骨料吸水率 /%	水泥浆水灰比
		细骨料	粗骨料					
单方配合比	200	876	584	240	1 910	1 670	13	0.26
单位配合比	1	4.36	2.92	1.2				

建筑垃圾混凝土经高压把拌合物在压制成型机的模具内强行压制在一起,形成具有一定出模强度的砖坯,然后自养护而成建筑垃圾骨料混凝土砖。

2.3 建筑垃圾骨料混凝土砖的性能

由于建筑垃圾骨料与天然岩石骨料相比,具有孔隙率高、吸

水性大、强度低等特征,用建筑垃圾骨料新拌混凝土的工作性(流动性、可塑性、稳定性、易密性)将因孔隙率大、吸水性强而下降。建筑垃圾骨料混凝土硬化后的特性(强度、应力应变关系、弹性模量、泊松比、收缩、徐变)都会与天然骨料有所不同。

为研究砂率对建筑垃圾混凝土标准砖强度的影响,进行了

六组试验,粗、细骨料的质量比(砂率比)分别为 20%:80%、30%:70%、40%:60%、50%:50%、60%:40%、70%:30%、80%:20%。水泥掺量为 12%,水灰比为 0.35,单位配合比为:水泥:骨料:水 =1:7:0.35,测试结果如表 8 所示。

表 8 砂率对建筑垃圾混凝土标准砖的强度影响				
	砂率/%	3 d 强度	28 d 强度	和易性
1	30	3.1	9.7	差
2	40	4.1	13.2	较差
3	50	4.6	14.9	较好
4	60	4.8	14.6	较好
5	70	4.3	12.8	较好
6	80	3.8	12.4	较好

粉煤灰的引入可以提高建筑垃圾砖的后期强度,其影响幅度大约为 1%~15%。粉煤灰的掺入还可明显增加拌合物的合易性及制成品的密实度。但是粉煤灰的掺入也增加了生产环节及工序,加大了生产及材料成本。用粉煤灰替代细骨料进行的一组试验见表 9 所示,可以看出,该批建筑垃圾骨料的粉煤灰的合理掺量为 15%。

表 9 粉煤灰对抗压强度的影响				
粉煤灰代细骨料百分比/%	7 d 强度	28 d 强度	60 d 强度	
0	6.80	12.50	13.10	
5	6.42	12.30	13.70	
10	6.60	12.20	14.10	
15	7.86	13.60	16.00	
20	6.90	12.36	14.70	
25	8.28	14.16	15.36	

在建筑垃圾砖中,水泥含量、粉煤灰含量、细骨料含量、含泥量越高,干缩越大;粗骨料含量越大、骨胶比越大,干缩越小。建筑垃圾砖的体积吸水率约为 16%~20%。

从以上试验结果可以看出:①建筑垃圾骨料的细度模数 3.46,属于粗砂;②建筑垃圾骨料的压碎指标性能满足大多数实际制砖混凝土的要求;③建筑垃圾骨料的粒径分布为0~5 mm 颗粒约占 60%~70%,5~10 mm 约占 40%~30%,可以满足配制强度为 15 MPa 混凝土的需要;④粗、细骨料的重量比(砂率)达到50%以上时混凝土的工作性比较好、标准砖强度可以达到 12.4~14.9 MPa;⑤用粉煤灰替代细骨料可以改善工作性能和密实度,粉煤灰的合理掺量为 15%。

2.4 讨论

混凝土空心砌块或混凝土多孔砖砌体的抗裂性能比黏土砖差,由于建筑垃圾砌块的吸水率高,其抗裂性能更差,为保证建筑垃圾砌块砌体的抗裂性能满足要求,可以采取相应的措施:对建筑垃圾混凝土砖材料控制,保证砌块的强度、密实度、含水率满足要求;加强墙体施工控制,在施工过程中,要严格执行国家现行有关标准规范,要彻底改变传统的操作工艺,必须确保水平和竖直灰缝饱满度达到现行规程要求;砌块运到工地后,堆场要有防水措施,四周要有排水沟,下雨要有遮盖,保证潮湿砌块不上墙,砌筑过程中如遇下雨要遮盖砌体;砌墙时每层高应分 2~3 次砌筑,不得 1 次到顶,填充墙顶斜砖应尽量迟塞,并注意灰缝饱满;从构造设计上控制裂缝,在墙体适宜的部位设置控制缝释放砌块变形产生的内应力,并在控制缝处加设涂塑耐碱玻璃纤维网格布增强层以分散内应力和抑制墙体裂缝的扩展;在界面接缝处的表面层采用柔性连接,减少墙体的绝对收缩值释放墙

体应力;减小构造柱间距以减小墙的长度.一般为 2.5~3 m;使用玻璃纤维网布涂塑耐碱玻璃纤维网格布增强层的施工。

3 结论

从上述试验研究可以看出,只要经过工艺控制,分离建筑垃圾中的主要材料混凝土制造再生骨料混凝土和直接破碎建筑垃圾制造再生骨料混凝土砌块都可以满足混凝土和混凝土砌块的要求。再生混凝土骨料和再生建筑垃圾骨料的性能不同于普通砂石骨料,再生混凝土骨料制备混凝土和再生建筑垃圾骨料制备混凝土砌块有如下的性能特点:

- (1) 直接用破碎的连续级配再生混凝土骨料配制混凝土,其工作性能和强度都会明显降低,抗压强度仅能达到天然骨料混凝土的 57%。
- (2) 按混凝土泵送施工技术规范中的最佳级配范围的上包络线、下包络线和最佳级配曲线进行设计,配制再生骨料混凝土,其骨料中粒径范围 4.75~19 mm 的骨料占粗骨料的 56%~80%,这时工作性能变差、抗压强度更低,为直接用破碎的连续级配再生骨料配制的混凝土强度的 70%~77%。
- (3) 粒径范围 4.75~19 mm 的骨料占粗骨料的 35%~40%时,再生骨料混凝土的工作性能好、抗压强度达到 42~44.1 MPa。
- (4) 再生骨料部分替代天然骨料,替代率为 53%~60%时,不论全部级配范围的替代,还是仅替代粒径范围 4.75~19 mm 的骨料或粒径范围 19~31.5 mm 的骨料,再生骨料混凝土的工作性能好、抗压强度达到 45.2~48.2 MPa。
- (5) 建筑垃圾骨料的细度模数 3.46,属于粗砂。
- (6) 建筑垃圾骨料的压碎指标性能满足大多数实际制砖混凝土的要求。
- (7) 建筑垃圾骨料的粒径分布为 0~5 mm 颗粒约占 60%~70%,5~10 mm 约占 30%~40%,可以满足配制强度为 15 MPa 混凝土的需要。
- (8) 粗、细骨料的重量比(砂率)达到 50%以上时混凝土的工作性比较好、标准砖强度可以达到 12.4~14.9 MPa。
- (9) 用粉煤灰替代细骨料可以改善工作性能和密实度,粉煤灰的合理掺量为 15%。

参考文献:

[1] 年度数据[OB/OL].中华人民共和国国家统计局: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj>.
[2] Cement Statistics and Information: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement>.
[3] SHI G, XU X Z. Estimation and forecasting of concrete debris amounts in China. Resource[J]. Innovation and Recycling, 2006, 49(2): 147-158.
[4] TAM V W Y, TAM C MA. review on the viable technology for construction waste recycling[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006, 47(3): 209-221.
[5] 许岳周.再生骨料混凝土级配强度研究与数值模拟[D].厦门大学硕士学位论文, 2007.
[6] 许岳周, 石建光.再生骨料及再生骨料混凝土性能分析与评价[J].混凝土, 2006(7): 41-45.

作者简介: 许岳周(1980-),男,硕士。
单位地址: 浙江省宁波市环城西路南段 695 号 宁波中鼎建筑设计研究院(315000)
联系电话: 15824512833